

Введение Нефтяное месторождение и система вскрывающих его нагнетательных и добывающих скважин представляют собой единый объект, работа всех элементов которого тесно взаимосвязана и сопровождается сложными процессами тепломассопереноса. Нефтяные пласты, как правило, имеют сложное геометрическое строение и неоднородную по абсолютной проницаемости и пористости структуру. Процесс фильтрации в пласте представляет собой течение многофазных многокомпонентных смесей, в котором происходит нетривиальное взаимодействие фаз, а нефти могут проявлять неньютоновские свойства. В свою очередь, подъем пластовой продукции на поверхность земли с помощью добывающих скважин также сопровождается нелинейными термо- и гидродинамическими эффектами, фазовыми переходами, изменением структурных форм течения смеси и т.д. как в трубах скважин, так и в каналах подземного насосного оборудования, например, установок погружных электроцентробежных насосов (УЭЦН), применяемых для перекачки водонефтегазовых смесей. В состав таких установок входят ЭЦН, погружные электродвигатели (ПЭД), газосепараторы и диспергаторы, работа которых также зависит от состава перекачиваемой продукции, расходов фаз и других температурных и гидродинамических факторов. Для управления и диагностики работы подземного оборудования (например, ПЭД) широко используются наземные станции управления (СУ). Они имеют не только прямую связь с УЭЦН, инициируя включение или отключение двигателя установки, но и осуществляют прием и обработку энергетических параметров (силы тока ПЭД, сопротивления жилы питающего установку кабеля и пр.) и показаний телеметрических датчиков УЭЦН о температуре и давлении на приеме ЭЦН, степени вибрации установки и т.д. Специальная программа контроллера СУ может осуществлять не только анализ этих данных, но и вырабатывать соответствующие управляющие воздействия на работу УЭЦН (обратная связь), вплоть до ее отключения в аварийных ситуациях. Математические модели, применяемые для описания процессов тепломассопереноса в отдельных элементах комплекса «пласт - система скважин - УЭЦН» (см., обзоры в работах [1-6]), строятся с учетом конкретных специфических особенностей многофазных потоков в областях их движения - соответственно, в пористой среде, трубах скважины, проточных каналах ступеней насосного узла погружной установки. Эти модели, как правило, сами по себе представляют собой сложные системы нелинейных дифференциальных уравнений, которые существенно отличаются как по типу, так и по методам их решения. Исследование же режимов эксплуатации всего комплекса как единого целого и их оптимизация требуют совместного решения этих систем уравнений, что приводит к значительным трудностям. Поэтому большинство публикаций (например, [7,8,9-13]) по данной тематике посвящено вопросам изучения характеристик отдельных элементов комплекса без учета их взаимосвязи. Так, при расчете фильтрационного

процесса в нефтяном пласте учет работы добывающих и нагнетательных скважин, вскрывающих коллектор, моделируется граничными условиями, в которых на забое каждой скважины задается либо давление, либо ее суммарный дебит. В первом случае в результате решения фильтрационной задачи определяется суммарный дебит, а во втором - забойное давление. При этом совершенно не учитывается тот факт, что условия на забое могут оказаться недостаточными или вообще неприемлемыми для обеспечения нормальной работы скважин. Такие ситуации могут возникать, например, в добывающих скважинах, в которых для подъема продукции используются погружные электроцентробежные установки. Это связано с тем, что допустимый диапазон подач, в котором работа ЭЦН является стабильной, достаточно узок: их значения должны составлять примерно от 0,7 до 1,3 долей от оптимальной производительности насоса при перекачке многофазной смеси. В свою очередь, рабочий диапазон подач и напорная характеристика ЭЦН существенно зависят от структуры и состава смеси на приеме насосного узла. Состав смеси определяется как обводненностью продукции, поступающей в скважину из пласта, так и процессами межфазного массообмена при ее движении в лифтовых трубах. Массообменные процессы возникают по мере снижения давления в скважине ниже давления насыщения нефти газом, приводя к образованию новой свободной газовой фазы в потоке. Если величина забойного давления такова, что разгазирование происходит ниже координаты подвески насоса, то на его прием поступает смесь, наличие газа в которой при объемной газонасыщенности свыше 25% на входе в первую ступень оказывает весьма вредное влияние на характеристики работы ЭЦН (вплоть до срыва подачи при газосодержании ~35%). С другой стороны, если в течение некоторого периода нефтедобычи граничные условия на забое скважин отвечали условиям их нормальной работы, то в дальнейшем в результате неизбежного фильтрационного перераспределения водяной и нефтяной фаз по всей протяженности пласта может произойти такое изменение суммарного дебита (или давления) и состава продукции на забое добывающих скважин, при котором механизированный подъемник начнет работать вне допустимых диапазонов, что в реальных условиях приведет к отключению двигателя установки контроллером СУ. После этого начнется процесс восстановления забойного давления, сопровождающийся повышением уровня жидкости в скважине за счет продолжающегося постепенно затухающего притока из пласта. Очевидно, что в данной ситуации граничные условия для фильтрационной задачи на забое "отключенной" скважины должны формироваться с учетом происходящих в ней процессов. Сложность численного моделирования процессов в едином комплексе «пласт - система скважин - УЭЦН» обусловлена не только специфическими особенностями процессов в каждом из ее элементов, но и затратами машинного времени для проведения расчетов. Однако в последние

годы происходит бурное развитие многопроцессорных компьютеров и суперЭВМ, технологий параллельных вычислений и алгоритмических языков программирования. Их применение позволяет повысить эффективность реализации подобных задач на ЭВМ и связанных с ними задач анализа и прогнозирования рабочих характеристик всех элементов системы разработки нефтяного месторождения. В представленной работе приведена общая замкнутая математическая модель термо- и гидродинамических процессов в неоднородном нефтяном пласте, взаимодействующем с системой вскрывающих его нагнетательных и добывающих скважин, оборудованных УЭЦН, а также примеры, иллюстрирующие ее работоспособность и эффективность применения методов распараллеливания вычислений и графической визуализации результатов расчетов. Особенность построения общей математической модели заключается в необходимости описания процессов, происходящих при течении многофазных смесей в различных областях комплекса «пласт - система скважин - УЭЦН», и последующего сопряжения решений соответствующих уравнений на границах этих областей. Математическая постановка Математическая модель фильтрации в пласте в рамках крупномасштабного приближения. Рассмотрим процесс двухфазной двухкомпонентной (вода, нефть) фильтрации в неоднородном нефтяном пласте, достаточно тонком по сравнению с его размерами в плане, вскрытом системой произвольно расположенных скважин. Абсолютная проницаемость K , пористость m , толщина H , начальная водонасыщенность S_0 могут изменяться по простиранию коллектора, его кровля и подошва непроницаемы. Так как мощность пласта значительно меньше его протяженности, то осредненная по толщине коллектора система нелинейных дифференциальных уравнений [1,2] фильтрационного процесса в области $D_{пл} = \{0$